

Manual de experimentos

WL 110.01 Intercambiador de
calor de tubo

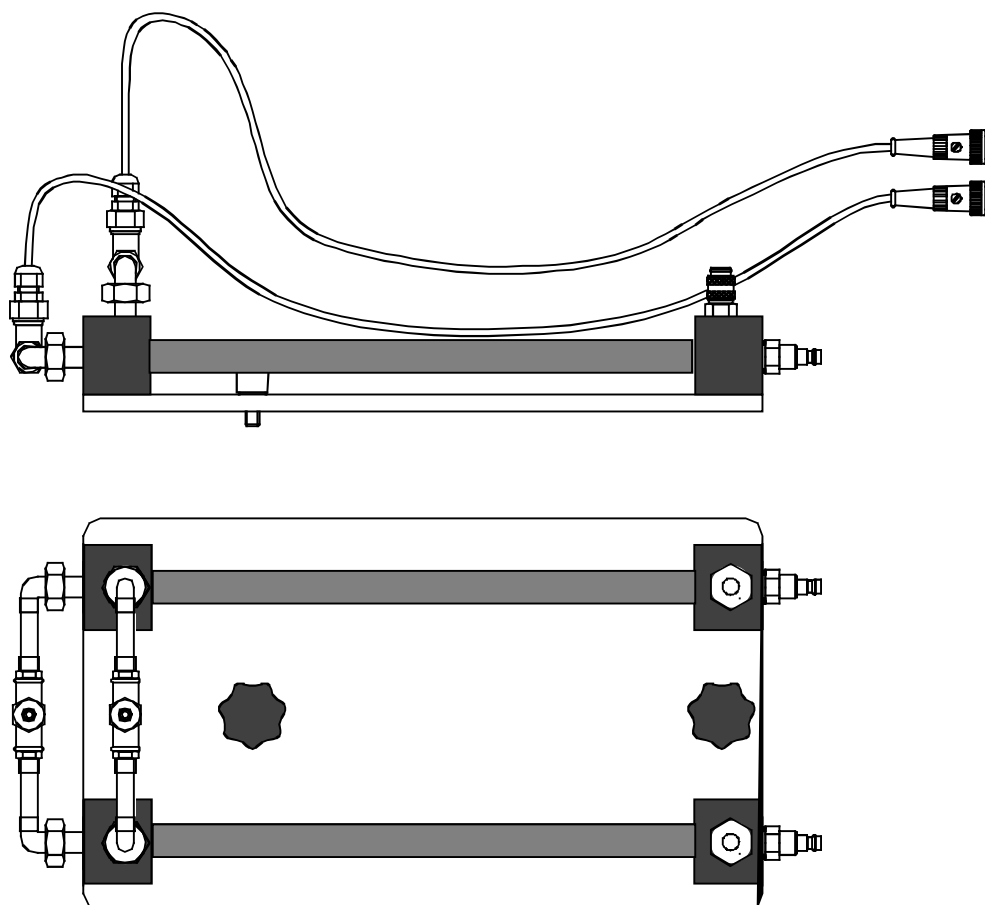
G.U.N.T. Gerätebau GmbH

Fahrenberg 14

D-22885 Barsbüttel • Alemania

Teléfono +49 (40) 670854-0

Telefax +49 (40) 670854-42



Manual de experimentos

¡Antes de la primera puesta en marcha del equipo lea atentamente las medidas de seguridad!

¡El equipo sirve exclusivamente para educación y formación así como para investigación! ¡No ha sido concebido para el uso industrial!

Indice General

1	Introducción	1
1.1	Finalidad de los intercambiadores de calor	1
1.2	Funcionamiento de un intercambiador de calor	1
1.2.1	Transmisión de calor del medio a la pared	2
1.2.2	Conducción de calor dentro de la pared	3
1.2.3	Coeficiente medio de transmisión térmica	3
1.3	Flujo calorífico a través del intercambiador de calor	5
1.4	Pérdidas en el intercambiador de calor	6
1.5	Evolución de la temperatura	7
2	Experimentos	10
2.1	Preparativos	10
2.1.1	Calentamiento del depósito de agua caliente	10
2.1.2	Purga del aire del intercambiador de calor	10
2.2	Realización de ensayos	11
2.3	Análisis	12
3	Anexo	15
3.1	Símbolos y unidades	15
3.1.1	Símbolos	15
3.1.2	Indices	16
3.2	Fórmulas	16
3.3	Tablas	17
3.4	Datos técnicos	18

1 Introducción

1.1 Finalidad de los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor se utilizan para transmitir calor entre dos medios. Durante la transmisión, los medios no entran en contacto directo ni se mezclan. El calor se transmite del medio caliente al frío a través de una pared termoconductora. Algunas aplicaciones características del intercambio de calor son los radiadores de coche (aire/agua), los radiadores de aceite (aceite/agua) o los serpentines refrigerantes en armarios de hielo (refrigerante/aire). En banco de ensayos WL 110 los dos medios son agua.

1.2 Funcionamiento de un intercambiador de calor

El medio caliente que fluye aporta calor a la pared y, al hacerlo, se enfría. La pared calentada transmite el calor al medio frío que fluye al otro lado de ésta. De este modo, el medio frío se calienta. Así pues, el proceso de transmisión de calor se puede dividir en 3 pasos:

1. El medio caliente aporta calor a la pared
2. La pared transmite el calor del lado caliente al frío
3. La pared aporta calor al medio frío

La figura 1.1 muestra la evolución de la temperatura en la pared. Cada paso de la transmisión de calor tiene asignada una diferencia de temperatura: ΔT_1 , ΔT_w y ΔT_2 .

Nota: En lo sucesivo, se considerará que la parte caliente tiene asignado el índice **1** y la fría el **2**. **E** significa "entrada" y **A**, "salida"; a la pared se le asigna el índice **w**.

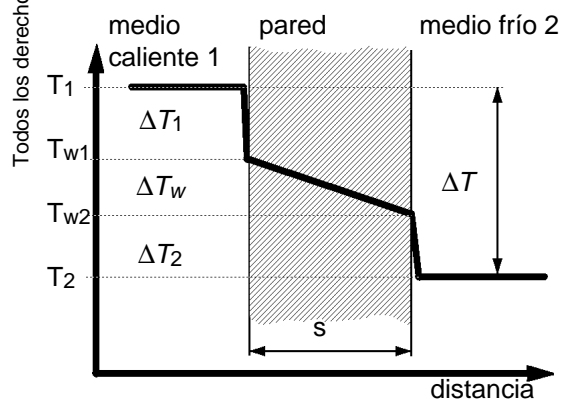


Fig. 1.1 Perfil de temperatura en una pared termoconductora

1.2.1 Transmisión de calor del medio a la pared

El proceso de transmitir calor de un medio a una pared o a la inversa se describe mediante los coeficientes de transferencia de calor α :

$$Q = \alpha A \Delta T t \quad (1.1)$$

La fórmula muestra que la cantidad de calor que se puede transmitir durante un tiempo t depende de la superficie de intercambiador de calor A y de la diferencia de temperatura entre el medio y la pared ΔT . El flujo calorífico que fluye durante la transmisión de calor se denomina con una unidad de potencia, kW o kJ/s.

La ecuación general del flujo calorífico \dot{Q} es:

$$\dot{Q} = \alpha A \Delta T \quad (1.2)$$

O, dado el caso, del lado de pared caliente con el medio 1 o del lado frío con el medio 2:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A \Delta T_1 \quad (1.3)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_1 = T_1 - T_{w1} \quad (1.4)$$

$$\dot{Q} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (1.5)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_2 = T_2 - T_{w2} \quad (1.6)$$

1.2.2 Conducción de calor dentro de la pared

La pared transmite el calor del lado caliente al frío.
En este caso se establece la relación siguiente:

$$\dot{Q} = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} \quad (1.7)$$

$$\text{Siendo } \Delta T_w = T_{w1} - T_{w2} \quad (1.8)$$

En la fórmula, λ es el coeficiente de conductibilidad térmica del material de la pared y s el grosor de la pared.

1.2.3 Coeficiente medio de transmisión térmica

Como el flujo calorífico en estado estacionario es igual durante las 3 etapas, se puede afirmar que:

$$\dot{Q} = \alpha_1 A \Delta T_1 = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (1.9)$$

o, dicho de forma más sencilla, el **coeficiente medio de transmisión térmica** del intercambiador de calor k_m es:

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.10)$$

El flujo calorífico \dot{Q} es, entonces:

$$\dot{Q} = k_m A \Delta T \quad (1.11)$$

$$\text{Siendo } \Delta T = T_1 - T_2 \quad (1.12)$$

El coeficiente medio de transmisión térmica es característico del intercambiador de calor. Permite comparar entre sí distintos intercambiadores de calor. Si se toma un tipo de construcción determinado, el coeficiente medio de transmisión térmica es relativamente constante, por lo que contribuye a dimensionar intercambiadores de calor cuyo tipo de construcción es similar.

Como la temperatura a lo largo de la pared divisoria no es constante, hay que contar con una diferencia de temperatura media. La evolución de la temperatura no es lineal; por eso, en vez de la media aritmética, se debe utilizar la media logarítmica ΔT_{\ln} . Además, por norma general la superficie del lado caliente y del frío no es igual de grande, por lo que también se debe utilizar una superficie media A_m .

De aquí se deriva la siguiente ecuación para el flujo calorífico:

$$\dot{Q} = k_m A_m \Delta T_{\ln} \quad (1.13)$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})}{\ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right)} \quad (1.14)$$

$$A_m = \frac{A_1 - A_2}{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (1.15)$$

Nota: ***ln*** es el logaritmo natural basado en el número de Euler ***e* = 2,71828**.

1.3 Flujo calorífico a través del intercambiador de calor

En la figura 1.2 se representa esquemáticamente el flujo de energía y calor en un intercambiador de calor. No se han incluido las pérdidas.

El flujo calorífico intercambiado \dot{Q}_w se calcula a partir de la diferencia entre el flujo de entrada y el de salida \dot{Q}_E y \dot{Q}_A . Si se toma un intercambiador de calor ideal sin pérdidas, no importa si se utiliza el medio caliente o el frío para el cálculo. Por norma general, el flujo calorífico se calcula a partir del caudal másico \dot{m} , la capacidad térmica específica c_p y la temperatura absoluta T :

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p T \quad (1.16)$$

De este modo, el flujo calorífico intercambiado es:

$$\dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{1A} - \dot{Q}_{1E} = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E}) \quad (1.17)$$

para el medio 1

$$\dot{Q}_{w2} = \dot{Q}_{2A} - \dot{Q}_{2E} = \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) \quad (1.18)$$

para el medio 2

Si no hay pérdidas:

$$\dot{Q}_w = -\dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{w2} \quad (1.19)$$

Si los dos flujos caloríficos son distintos, el intercambiador de calor tendrá pérdidas, por lo que en el cálculo siguiente se utiliza el valor medio:

$$\dot{Q}_{wm} = \frac{(-\dot{Q}_{w1}) + \dot{Q}_{w2}}{2} \quad (1.20)$$

De este modo se puede calcular el coeficiente medio de transmisión térmica del intercambiador de calor:

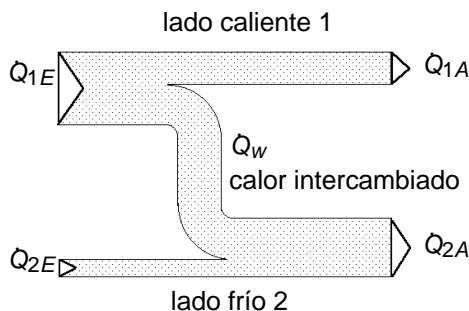


Fig. 1.2 Transmisión de energía en un intercambiador de calor sin pérdidas

$$k_m = \frac{\dot{Q}_{wm}}{A_m \Delta T_{\ln}} \quad (1.21)$$

$$k_m = \frac{m_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) - m_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E})}{2 A_m (\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})} \ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right) \quad (1.22)$$

$$\text{Siendo } m_1 = \rho_1 \dot{V}_1 \quad (1.23)$$

$$\text{Y siendo } m_2 = \rho_2 \dot{V}_2 \quad (1.24)$$

1.4 Pérdidas en el intercambiador de calor

Si hay un defecto en el aislamiento, se presentan pérdidas en el intercambiador de calor. Cuando se quiera definir un grado de efectividad que tenga en cuenta estas pérdidas, se debe distinguir entre dos casos. El grado de efectividad se define básicamente como la relación entre uso y consumo. En el caso del enfriamiento del medio caliente, el uso es el calor emitido por el medio caliente y el consumo es el calor que debe transportar el medio frío.

$$\eta_{kühl} = \frac{\dot{Q}_{w1}}{\dot{Q}_{w2}} \quad (1.25)$$

Las pérdidas por radiación o convección mejoran el grado de efectividad en este caso. En el caso del calentamiento de un medio, el uso es la cantidad de calor absorbida por el medio frío y el consumo es el calor que produce el medio caliente.

$$\eta_{heiz} = \frac{\dot{Q}_{w2}}{\dot{Q}_{w1}} \quad (1.26)$$

1.5 Evolución de la temperatura

La evolución de la temperatura a través del intercambiador de calor en sentido longitudinal es muy difícil de calcular. En consecuencia, aquí sólo se explicará grosso modo un procedimiento para solucionar el problema. La caída y la subida de la temperatura son proporcionales a la cantidad de temperatura intercambiada a través de la pared divisoria. Ésta, a su vez, es también proporcional a la diferencia de temperatura entre los dos medios. Así pues, para los intercambiadores de calor de corriente paralela son válidas las relaciones diferenciales siguientes:

Emisión de calor, medio 1

$$\frac{dQ}{dx} = - m_1 c_{p1} \frac{dT_1}{dx} \quad (1.27)$$

Absorción de calor, medio 2

$$\frac{dQ}{dx} = m_2 c_{p2} \frac{dT_2}{dx} \quad (1.28)$$

Conducción de calor a través de la pared

$$dQ = k (T_1 - T_2) dA \quad (1.29)$$

$$\text{Siendo } dA = b dx \quad (1.30)$$

Aquí A es la superficie de intercambiador de calor con ancho b y longitud x. k es el coeficiente de transmisión térmica local. Si se parte de la sencilla suposición de que las dimensiones son independientes de la temperatura, estas ecuaciones dan lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden para la evolución de la temperatura según el recorrido x:

$$\frac{dT_1(x)}{dx} = -k_1 T_1(x) + k_1 T_2(x) \quad (1.31)$$

$$\text{Siendo } k_1 = \frac{k b}{c_{p1} \dot{m}_1} \quad (1.32)$$

$$\frac{dT_2(x)}{dx} = k_2 T_1(x) - k_2 T_2(x) \quad (1.33)$$

$$\text{Siendo } k_2 = \frac{k b}{c_{p2} \dot{m}_2} \quad (1.34)$$

Las soluciones a este sistema de ecuaciones de evolución de la temperatura a través del intercambiador de calor en sentido longitudinal tienen la estructura siguiente.

Con corriente paralela:

$$T_1(x) = (A_0 + A_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (1.35)$$

$$T_2(x) = (B_0 + B_1 x) e^{-(k_1 + k_2) x} \quad (1.36)$$

Con corriente inversa:

$$T_1(x) = (C_0 + C_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (1.37)$$

$$T_2(x) = (D_0 + D_1 x) e^{-(k_2 - k_1) x} \quad (1.38)$$

Las constantes A - D son expresiones muy complejas que, para simplificar el conjunto, no se detallan. Lo importante es que las temperaturas evolucionan de forma exponencial y no lineal. Con corriente inversa, se da un caso especial: si las constantes k_1 y k_2 son iguales, la evolución puede ser lineal y paralela. La evolución de la tempera-

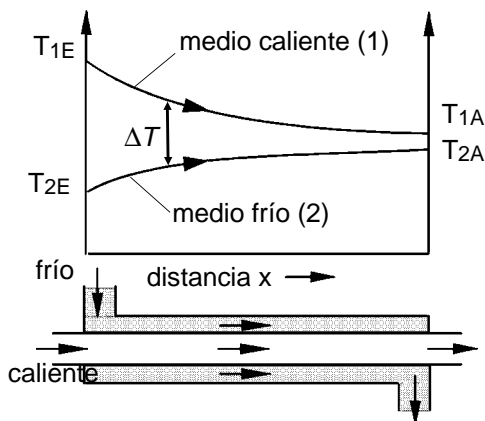


Fig. 1.3 Perfil de temperatura en el intercambiador de calor en sentido longitudinal con corriente paralela

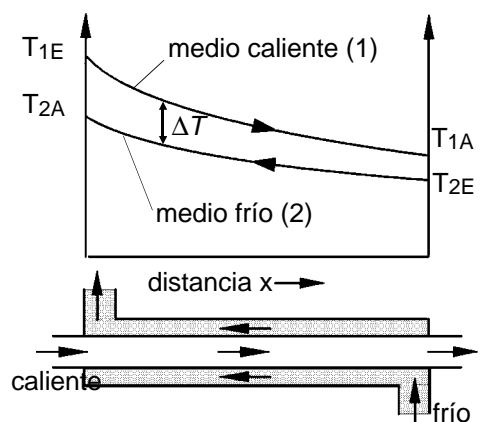


Fig. 1.4 Perfil de temperatura en el intercambiador de calor en sentido longitudinal con corriente inversa

tura se muestra gráficamente en las figuras 1.3 y 1.4. También es interesante el hecho de que, con corriente inversa, la temperatura de salida T_{2A} del medio calentado puede ser mayor que la temperatura de salida del medio enfriado T_{1A} . En cambio, en el caso de la corriente inversa, T_{2A} es siempre menor que T_{1A} .

2 Experimentos

2.1 Preparativos

2.1.1 Calentamiento del depósito de agua caliente

- Comprobar el nivel de agua en el depósito y llenarlo si es necesario.
- Encender el interruptor primario.
- Ajustar en el termostato la temperatura que se desea del agua caliente.
- Encender la calefacción. Se necesitan unos 20 minutos para aumentar la temperatura ambiente a 60. Mientras se calienta el agua, se puede empezar a purgar el aire del intercambiador de calor.

2.1.2 Purga del aire del intercambiador de calor



- Conectar el intercambiador de calor al equipo básico mediante los tubos según si se desea trabajar con corriente paralela o inversa. Sólo hay que cambiar los tubos de agua fría del intercambiador de calor. **De lo contrario, existe peligro de quemaduras.**
- Ajustar un caudal de entrada de agua fría alto mediante la válvula reguladora. Dejar fluir el agua unos instantes hasta que no queden burbujas.
- Conectar la bomba.
- Ajustar un caudal de agua caliente alto mediante la válvula reguladora y dejar fluir el agua unos instantes.

**Precaución cuando el sistema esté caliente.
Peligro de quemaduras con el agua de salida.**

2.2 Realización de ensayos

La corriente de agua caliente conserva el sentido con ambos modos de funcionamiento.

- Ajustar el caudal de agua fría y caliente que se desea mediante las válvulas reguladoras.
- Una vez ajustados los caudales, esperar a que se alcance un equilibrio térmico. Esto ocurre cuando las temperaturas cambian menos de 1 C por minuto. Para ello basta con observar las dos temperaturas de salida T3 y T6 (con corriente paralela) o T3 y T4 (con corriente inversa).

NOTA:

Si no se alcanza un equilibrio térmico, los datos medidos darán lugar a resultados de ensayo falsos.

- Una vez alcanzado un estado térmico estable, las temperaturas se leen y se registran en una hoja de cálculo, junto con los caudales ajustados. Si se utiliza el registro de datos de medición en PC, los datos de medición estarán disponibles en un archivo.

Nota: El agua fría que sale de las tuberías suele tardar bastante tiempo en fluir a una temperatura constante. Por eso, antes de realizar los ensayos es importante que el agua fluya un rato al máximo caudal.

2.3 Análisis

Los ensayos se evalúan con la hoja de trabajo y las fórmulas recogidas en el capítulo 6, o con el registro de datos de medición en PC. Los valores necesarios c_p y ρ se obtienen de la tabla conforme a la temperatura media $T_{m1,2}$. Si la temperatura no aparece en la tabla, los valores se pueden interpolar linealmente. En el caso de los caudales y de los caudales másicos, hay que prestar especial atención a que todas las magnitudes hagan referencia a segundos conforme al sistema internacional de unidades SI. Las temperaturas se deben indicar en grados Kelvin, como es habitual en termodinámica. Ahora bien, como siempre se trata de diferencias de temperatura, no es necesario efectuar la conversión.

En las páginas siguientes se muestra un ejemplo de evaluación de una serie de ensayos. Los valores se han registrado mediante el registro de datos de medición en PC y se han elaborado gráficamente con un programa de hoja de cálculo. Se detallan en la tabla 2.1.

V1 in L/min	V2 in L/min	T1 in °C	T3 in °C	T4 in °C	T6 in °C	Q1 in W	Q2 in W	km in kJ/m²sK
1.5	1.5	62.8	54.6	10.6	22.7	-844.55	1269.23	1.13
3.53	1.5	62.7	55.5	10.5	23.4	-1745.13	1353.15	1.65
3.53	5.4	54.1	44.4	10.2	14.5	-2351.07	1623.77	2.40
1	1	57.4	44.6	10.6	19.6	-878.88	629.37	0.96
1.5	1.5	61.4	48.4	20.5	10.2	-1338.92	1080.42	1.39
3	1.5	62.2	53.4	24	10	-1812.69	1468.53	1.82
1.5	3	61.9	46.1	16.8	10	-1627.30	1426.57	1.70
3.53	5.4	58	47.2	15.8	9.6	-2617.69	2341.26	2.78

Tab.2.1 Valores medidos y calculados a partir de un ejemplo de realización de ensayo
Arriba: corriente paralela Abajo: corriente inversa

La temperatura del agua caliente se ha ajustado a 60 C; la temperatura del agua fría era la de la canalización.



¡ATENCIÓN! Los valores indicados y los diagramas que de ellos se derivan se pueden desviar respecto a algunos resultados de ensayo.

En la figura 2.1 se muestra la evolución de la temperatura con corriente paralela. Las temperaturas de entrada T_e y las temperaturas de salida T_a se unen con una línea.

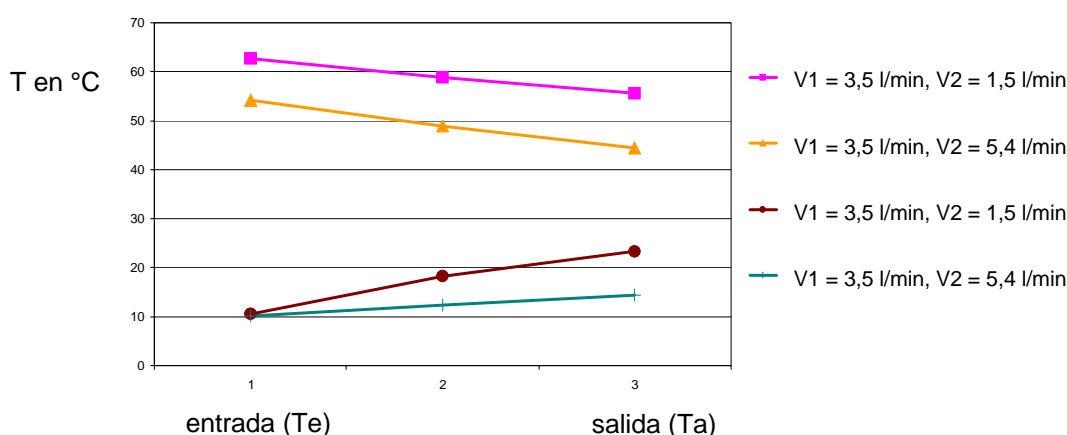


Fig. 2.1 Evolución de la temperatura con corriente paralela y distintas velocidades de flujo del agua fría

La figura 2.2 muestra la evolución de la temperatura con corriente inversa. El caudal másico influye en los coeficientes medios de transmisión térmica como se muestra en la figura 2.3.

El coeficiente de transmisión térmica k_m crece cuando aumenta el caudal. Eso se debe a que el aumento de la velocidad de fluido mejora la transferencia de calor. Una capa límite entre el líquido y la pared del tubo ejerce de aislante térmico. A medida que la inundación se vuelve más turbulenta, esta capa límite queda destruida y se mejora la transferencia de calor. Además, se puede ver que el coeficiente de transmisión térmica de los caudales constantes es independiente del sentido de flujo.

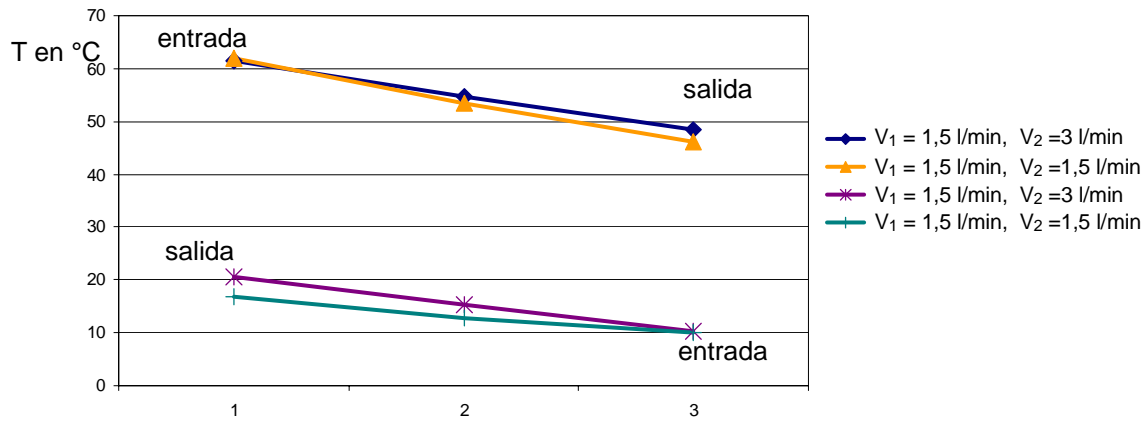


Fig. 2.2 Evolución de la temperatura con corriente inversa y distintas velocidades de flujo del agua fría

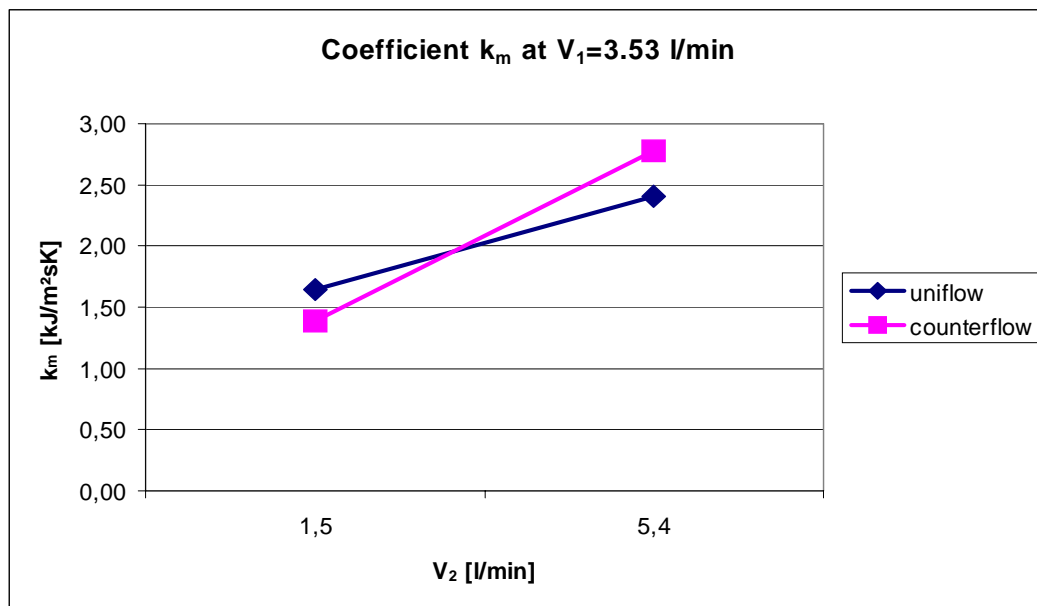


Fig.2.3 Coeficiente medio de transmisión térmica (k_m) con corriente paralela e inversa

3 Anexo

3.1 Símbolos y unidades

3.1.1 Símbolos

A,B,C,D: constantes en ecuaciones

A: intercambiador de calor m^2

A_m : superficie logarítmica media m^2

Q: cantidad de calor J

\dot{Q} : flujo calorífico W

T: temperatura K

\dot{V} : caudal $\frac{m^3}{s}$

ΔT_{ln} : diferencia temperat. logarítm. media K

b: ancho del IC m

c_p : capacidad térmica específica $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

k: coeficiente de transmisión térmica local $\frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot K}$

k_m : coeficiente medio de transmisión térmica $\frac{kJ}{m^2 \cdot s \cdot K}$

\dot{m} : caudal másico $\frac{kg}{s}$

s: grosor de la pared m

x: distancia m

α : coeficiente de transferencia de calor

η : efectividad $\%$

λ : valor de termoconductibilidad $\frac{W}{K \cdot m}$

ρ : densidad $\frac{kg}{m^3}$

ν : viscosidad cinemática $\frac{m^2}{s}$

3.1.2 Indices

A: salida
 E: entrada
 M: centro
 m: (valor) medio
 w: pared
 1,2,3,4,5,6 : puntos de medición de la temperatura
 1 : lado de agua caliente
 2 : lado de agua fría
 Δ : diferencia

3.2 Fórmulas

$$\dot{Q} = \alpha_1 A \Delta T_1 = \frac{\lambda A \Delta T_w}{s} = \alpha_2 A \Delta T_2 \quad (1.9)$$

$$k_m = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1.10)$$

$$\dot{Q} = k_m A \Delta T \quad (1.11)$$

$$\dot{Q} = k_m A_m \Delta T_{\ln} \quad (1.13)$$

$$\Delta T_{\ln} = \frac{(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min})}{\ln \left(\frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T_{\min}} \right)} \quad (1.14)$$

$$A_m = \frac{A_1 - A_2}{\ln \left(\frac{A_1}{A_2} \right)} \quad (1.15)$$

$$\dot{Q} = m c_p T \quad (1.16)$$

$$\dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{1A} - \dot{Q}_{1E} = \dot{m}_1 c_{p1} (T_{1A} - T_{1E}) \quad (1.17)$$

$$\dot{Q}_{w2} = \dot{Q}_{2A} - \dot{Q}_{2E} = \dot{m}_2 c_{p2} (T_{2A} - T_{2E}) \quad (1.18)$$

$$\dot{Q}_w = - \dot{Q}_{w1} = \dot{Q}_{w2} \quad (1.19)$$

$$\dot{Q}_{wm} = \frac{(- \dot{Q}_{w1}) + \dot{Q}_{w2}}{2} \quad (1.20)$$

$$k_m = \frac{\dot{Q}_{wm}}{A_m \Delta T_{ln}} \quad (1.21)$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V} \quad (1.22)$$

$$\eta_{cool} = \frac{\dot{Q}_{w1}}{\dot{Q}_{w2}} \quad (1.25)$$

$$\eta_{heat} = \frac{\dot{Q}_{w2}}{\dot{Q}_{w1}} \quad (1.26)$$

3.3 Tablas

Temperatura		Densidad ρ [kg/dm ³]	Capacidad térmica específica c_p [kJ/kg K]
T [°C]	T [K]		
0	273	0,9998	4,220
20	293	0,9982	4,183
40	313	0,9921	4,178
60	333	0,9830	4,191
80	353	0,9720	4,199
100	373	0,9580	4,216

Tab. 3.1 Valores del agua a 1.013 mbar

3.4 Datos técnicos

Superficie de intercambiador de calor:

Superficie logarítmica media: 0,04 m^2

Caudal máximo

lado caliente y frío: 600 l/h

Elemento PTC: -40 a 150 °C